УДК 550.831

Дубовенко Ю.И., канд. физ.-мат. наук, н.с.,
Черная О.А., канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины
г. Киев, пр. Палладина, 32, тел.: 0(44) 424-2052, dubovenko@igph.kiev.ua

О роли 4D гравитационного мониторинга геологической среды в решении геоэкологических задач

По [1, с. 82] „...если современные физико-математические теории строят и исследуют свои функциональные связи и последующие смысловые ряды на территории преимущественно *пространства*, то эксперимент зондирует пока еще не подвластное теории *время*". В частности, категорией времени овладевает 4D гравитационный мониторинг [2]. Под этим явлением понимаем ряд периодически повторяемых в реальном времени непрерывных на протяжении некоторо фиксированного временного отрезка микрогравиметрических измерений гравиполя с помощью портативных гравиметров и обработку данных с учетом влияния окружающей среды и сферы применений. Величина временного отрезка зависит от качества измерений, меры неопределенности результатов наблюдений, характера динамики (амплитуды и частоты) поля.

Физическая основа непрерывного гравиметрического мониторинга – непрерывная связь динамики гравиполя и параметров среды: ундуляциям рельефа сантиметрового диапазона отвечают вариации силы тяготения в несколько мГал. Если деформация дневного рельефа определенного участка есть прямым следствием приповерхностного распределения масс, результаты истолкования гравитационного мониторинга можно применить для мониторинга разуплотнения и флюидного режима этого участка. Пространственное распределение вариаций вертикальной производной V_z потенциала силы тяготения *прямо коррелирует* с плоскостным распределением плотностей, а временные вариации V_z четко определяют вертикальные вариации насыщения флюидов.

Аппаратная основа мониторинга среды – совместные крупномасштабные измерения превышений рельефа по данным GPS и гравиметрии (сотни стационарных пунктов на сотни км^2, измерение абсолютных значений силы тяжести). Гравиметры с относительным учетом силы тяжести дешевле, но имеют важные ограничения – *привязку* к опорной сети и *синхронный* учет „сползания нуля"). Непрерывные измерения силы тяжести в скважинах преобладают в разрешающей способности благодаря большей близости к источникам и устранению приповерхностных влияний.

К методике мониторинга. Применение классической схемы измерений на регулярной сети пунктов и следующий перерасчет значений на основе известного интеграла Пуассона пригодны для региональных исследований [3], но в локальных условиях, где ныне чаще всего применяют гравимониторинг [4], имеет ряд недостатков [5]. Для интерпретации измерений на коротких профилях предложена [5] система линейных интегральных уравнений с быстро убывающими ядрами:

$$S_{n+1}^{+}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{+}(\xi)\left(\cosh\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{+}(x),$$

$$S_{n+1}^{-}(x)=v(x)-\frac{1}{2\zeta_n(x)}\int_{-\infty}^{\infty}S_n^{-}(\xi)\left(\tanh\frac{\pi(\xi-x)}{2\zeta_n(x)}\right)^{-1}d\xi+S_n^{-}(x)$$

$$\zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x)=v(x),\ \zeta_0(x)=S_0^{+}(x)+S_0^{-}(x),\ n=\overline{0,\infty}.$$

С учетом этого методика [4] остается действенной и в определенных условиях (региональный фон – полином 1-й степени; известны *плотности* и *положения* границ тяготеющих тел на поверхности; эти тела близки или имеют общие контакты) определяет следующие шаги интерпретации гравианомалий:

1. VECTOR: пространственный анализ Δg разделяет аномалии от тяготеющих тел и определяет *эффективные глубины* их залегания и *квазиплотности* – нулевое приближение плотностной модели .
2. GRPR2: решение плоской обратной задачи дает *истинные глубины* залегания и *истинные плотности* тяготеющих тел – 1-е приближение модели.
3. ADG-3D: пространственная плотностная модели среды – окончательное решение задачи.

В наших условиях вместо VECTOR используется комплекс [6], разработанный на основе [7], а вместо GRPR2 – комплекс программ на основе [5].

Интерпретация данных мониторинга с целью оценки глубины к источнику аномалий и изменения объема по данным мониторинга деформации рельефа требует знания приповерхностного распределения масс по данным гравиметрии. Мониторинг деформаций земной поверхности получают на основе комплексов спутниковой геодезии GPS, имеющих ряд преимуществ перед традиционными геодезическими методами (независимость от времени суток, погоды, автоматика, непрерывность, полнота, надежная привязка к сети).

Приповерхностные неоднородности (карсты, плауны, зоны обводнения и разуплотнений), сложна структура

площади (складчатость, соляная тектоника, разломы), факторы поглощения полезного сигнала (температура, инструментальные влияния) ограничивают эффективность мониторинга, не снижая его практического значения.

Необоснованное упрощение аналитических моделей среды с целью снижения неоднозначности истолкования служит причиной неверных результатов вычислений (геометрии источников, вертикального и латерального распределения плотностных неоднородностей), особенно в случаях, когда среда вокруг аномального источника далека от предположений об однородности. Надежное количественное истолкование динамики масс, например, в мониторинге месторождений углеводородов получают при известной геометрии тяготеющих тел (по данным сейсмики) и комплексной интерпретации поля силы тяжести и деформаций рельефа.

Сфера применений. Повторяемые измерения гравитационного поля применяют в геодезии, сейсмологии и вулканологии (комплексное определение предвестников землетрясений и извержений), для мониторинга флюидной динамики месторождений и подземных хранилищ углеводородов в процессе их эксплуатации. Так, сравнение данных гравимониторинга месторождения и его аналитической модели обнаруживает отклонение наблюденного поля от модели добычи и является сигналом к детальному изучению месторождения методами ГИС и сейсмометрии. Решение пространственной прямой задачи гравиметрии [7] позволяет по данным микрогравиметрического мониторинга на этапе нагнетания жидкостей в подземные хранилища выявить их распределение и характер миграции по распределению плотностей.

Гравитационный мониторинг миграции CO_2 в месторождениях углеводородов основан на снижении их объемной плотности при нагнетании CO_2 в месторождение. Согласно [8], 1-км фронт флюида CO_2 внутри 20 м толщи пласта соли на глубине 1900 м в условиях 30% насыщение CO_2 и 70% насыщения раствором соли генерирует на поверхности гравианомалию 10 мГал Из решения обратной задачи гравиметрии по данным мониторинга можно восстановить *общую* картину вариаций плотности (снижение Δg обозначает уменьшение объема углеводородов вследствие их добычи и опускание газо-нефтяного контакта, увеличение Δg – поднятие уровня пластовых вод), но не абсолютные значения плотностей.

В условиях Сибири сопряженную обратную задачу – измерение временных вариаций гравианомалий (вследствие изменения положения водо-нефтяного контакта или уровня пластовых вод в скважинах) – можно использовать как недорогой метод 4D гравитационного мониторинга состояния вечной мерзлоты.

1. *Лоссовский Э. К.* О философии чистой априорной математики как главного конструктивного опорного раздела современного теоретического естествознания: обзор // Геофиз. журн.– 20 06. – **28**, № 2. - С. 80-93.
2. *Battaglia M., Gottsmann J., Carbone D., Fernandez J.* 4D volcano gravimetry // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. - P. WA3-WA18.
3. *Davis K., Li Y., Batzle M.* Time-lapse gravity monitoring: a systematic 4D approach with application to aquifer storage and recovery // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. – P. WA61-WA69.
4. *Болотнова Л. А.* Эколого-геологическое изучение состояния геологической среды урбанизированных территорий: геофизический аспект / В. В. Филатов, Л. А. Болотнова // IX геофиз. чтения им. В.В. Федынского. 1-3 марта 2007 г.: тез. докл. - Г., 2007. - С. 43-44;
5. *Дубовенко Ю. И.* Определение контактной границы по значениям производных логарифмического потенциала на существенно ограниченных множествах: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. 04.00.22. К., 2005. - 19 с.
6. *Legostaeva O.V., Starostenko V.I., Yegorova T.P.* Automatized system of 3-D gravity modelling: the main principles and software // Society Symposia, Solid Earth Geophysics & Geodesy, Annales Geophysicae, Part I, Supplement I.-1998.-V.16.-P.26;
7. *Старостенко В. И., Легостаева О. В.* Прямая задача гравиметрии для неоднородной произвольно усеченной вертикальной прямоугольной призмы // Физика Земли. - 1998. - № 12. - С. 31-44;
8. *Gasperikova E., Hoversten G.M.* Gravity monitoring of CO_2 movement during sequestration: model studies // Geophysics. – 2008. – **73**, No. 6. – P. WA105-WA112.

Dubovenko Yu.I., Chornaya O.A. On the role of 4D gravity monitoring of geological media for the solution of a geoecological problems.